

При низких температурах степень превращения сырья невелика из-за малой скорости реакций крекинга, но повышается селективность процесса. В продуктах процесса возрастает доля углеводородов изомерного строения и содержание наftenов. С ростом температуры увеличивается скорость реакций деструкции углеводородов, что приводит к снижению селективности процесса, увеличению степени превращения сырья в лёгкие продукты и росту коксообразования. Оптимальный интервал температур для ведения процесса гидрокрекинга составляет от 320 до 460 °С с постепенным повышением температуры от нижней границы к верхней границе по мере активности катализатора. Объёмная скорость подачи сырья связана с температурой процесса и в большинстве современных процессов гидрокрекинга составляет от 0,3 до 2,0 ч<sup>-1</sup>.

Величина давления водорода зависит от происхождения сырья: чем больше содержание в сырье серы, азота и ароматических углеводородов, тем выше требуется давление водорода в процессе гидрокрекинга. В случае переработки тяжёлых нефтяных дистиллятов, оптимальным является давление около 10–15 МПа. Если в качестве сырья используются продукты с высоким содержанием, как ароматических углеводородов, так и тяжёлых металлов, то процесс гидрокрекинга должен проводиться при давлениях около 20–30 МПа. На величину давления в процессе гидрокрекинга нефтяных дистиллятов оказывает влияние также содержание водорода в водородсодержащем газе. При пониженном содержании водорода в газе необходимо повышать общее давление для достижения необходимого парциального давления водорода. В современных установках гидрокрекинга применяют водородсодержащий газ с содержанием водорода более 90 %.

Перспектива широкого внедрения процесса гидрокрекинга в нефтепереработку потребует организации производств получения водорода, с использованием термokatалитических методов. Прежде всего, процессов паровой конверсии природного газа, сухих нефтезаводских газов или нефтяных остатков.

## **ГИДРОКРЕКИНГ СМЕСИ ГАЗОЙЛЕЙ С РЕЦИКЛОМ ОСТАТОЧНОГО ПРОДУКТА**

*Сафонов Ю. В., Кирсанов Ю. Г.  
УрФУ, y.g.kirsanov@ustu.ru*

На мировом рынке технологий имеется большое количество технологий переработки углеводородного сырья в процессе гидрокрекинга, предлагаемых фирмами-лицензиарами. Большая часть из них являются иностранными компаниями, такими как Honeywellcompany, ChevronLummusGlobal, Americanpetroleuminstitute (США), JFP и Axens (Франция). Предлагаемые ими технологии отличаются высокой энергоэффективностью, гибкостью и нашли широкое распространение в промышленности.

Технологические схемы гидрокрекинга отличаются по способу организации контакта реакционной массы и катализатора, по глубине превращения сырья, по числу ступеней реакторного блока.

Предлагаемые лицензиарами технологические решения на данный момент не имеют существенных отличий по показателям качества продукции, продолжительности межрегенерационного периода, качеству используемых катализаторов, материалам, применяемым при изготовлении реакторов. Поэтому, основными критериями выбора лицензиара становятся энергоэффективность и опыт промышленного внедрения процессов.

Нами проработан вариант двухступенчатой установки гидрокрекинга смеси прямогонного вакуумного газойля и газойля с установки замедленного коксования, поступающих с установок по переработке малосернистой западносибирской нефти. Проектная мощность установки принята 1200 тыс. т сырьевой смеси газойлей в год (80 % вакуумный газойль и 20 % газойль процесса замедленного коксования).

Свойства сырьевой смеси представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества сырья установки гидрокрекинга

Показатель	Единица измерения	Значение
Плотность	г/см <sup>3</sup>	0,9188
Содержание серы	% мас.	1,81
Содержание азота	мг/кг	1100
Коксуемость по Конрадсону	% мас.	0,25

Температуры кипения сырьевой смеси находятся в интервале температур от 346 до 576 °С.

Для обеспечения производства максимального количества дизельного топлива принято решение использования схемы полной конверсии сырьевой смеси, что потребовало включения в реакторный блок трех реакторов:

- реактор Р-1 для гидроочистки сырья и частичной его конверсии;
- реактор Р-2 для гидрокрекинга очищенного сырья;
- реактор Р-3 для крекинга остаточного продукта, выводимого из фракционирующей колонны.

Для организации процессов гидроочистки и гидрокрекинга приняты катализаторы фирмы Axens.

В реактор Р-1 загружен катализатор HDK 776, который относится к группе алюмоникельвольфрамовых катализаторов и позволяет достичь глубокой степени гидрообессеривания и гидродеазотирования вакуумного газойля. При использовании данного катализатора протекают также процессы легкого гидрокрекинга сырья. Для удаления металлов, солей, а также ПАУ из потока сырья солей, а также ПАУ из потока сырья, в зону фильтрации загружен катализатор HF 858 (алюмоникелькобальтмолибденовый). Для полного удаления мышьяка в зону фильтрации также загружен слой катализатора АСТ (никельмолибденовый).

В реакторе Р-2 первой ступени гидрокрекинга загружен катализатор НРК 558 (аморфный никельмолибденовый), селективный относительно получения среднестиллятных фракций моторных топлив и легко регенерируемый.

В качестве катализаторов второй ступени гидрокрекинга в реакторе Р-3 используется катализатор НУК 732 (цеолитный никельмолибденовый).

Рабочие параметры установки гидрокрекинга приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рабочие параметры установки гидрокрекинга смеси газойлей

Параметр		Ед. изм.	Значение
Температуры в реакторах	Первая ступень	$^{\circ}\text{C}$	< 390
	Вторая ступень		< 420
Давление (избыточное)		МПа	15
Объёмная скорость подачи сырья	Первая ступень	$\text{ч}^{-1}$	1,7
	Вторая ступень		1,5
Кратность циркуляции водорода		$\text{м}^3/\text{м}^3$	> 450
Чистота подпиточного водорода		% мол.	99,99
Концентрация водорода в водородсодержащем газе		% мол.	94

Для определения необходимого количества водородсодержащего газа (квенчинга), подаваемого на охлаждение реакционной массы в пространство между слоями катализатора, выполнены расчеты материально-тепловых балансов реакторного блока. Выполнение расчетов велось с использованием программы Aspenhysys компании Aspentech, которая широко используется в химической технологии, нефтепереработке. В нашем случае свойства таких потоков сырья, как фракция нефти, фракция дизельного топлива, исходное сырье, рециркулят моделировались путем задания компонентов в виде непрерывно кипящих смесей с определенными температурами кипения. Для описания фазового равновесия было использовано уравнение состояния Пенга-Робинсона. Каждой температуре кипения программа ставит соответствующее гипотетическое соединение, имеющее определённую молекулярную массу, коэффициенты уравнений состояния и другие физические свойства. Фракция нефти представлена как непрерывно кипящая смесь (30-120  $^{\circ}\text{C}$ ) с шагом 10  $^{\circ}\text{C}$ . Фракция дизельного топлива представлена как непрерывно кипящую смесь (130-340  $^{\circ}\text{C}$ ) с шагом 10  $^{\circ}\text{C}$ . Исходная смесь газойлей моделировалась на основании исходных данных о составе сырьевой смеси газойлей.

Алгоритм проведенных расчетов включал следующие последовательные операции:

- расчет состава водородсодержащего газа, его мольной массы;
- расчет потребления водорода во всем процессе, а также отдельно на реакции гидроочистки и гидрокрекинга;
- расчет минимально допустимой кратности циркуляции водорода и водородсодержащего газа;

- расчет материально-тепловых балансов слоев катализатора в реакторном блоке;
- расчет суммарного материального баланса установки;
- расчет распределения загрузки катализатора по реакторам, расчет геометрических размеров реакторов, минимально допустимых толщин обечаек.

Суммарный материальный баланс установки гидрокрекинга представлен в табл. 3.

Таблица 3

Суммарный материальный баланс установки гидрокрекинга

Приход			Расход		
Сырье	% масс.	тыс. т/год	Продукция	% масс.	тыс. т/год
Вакуумный газойль	64,08	1020000	Топливный газ	0,90	14195
Тяжёлый газойль УЗК	11,31	180000	Фракция C <sub>3</sub> - C <sub>4</sub>	4,30	68135
ЦВСГ	24,61	391680	Нафта	7,90	125165
			Дизельная фракция	62,00	989925
			H <sub>2</sub> S	1,44	22800
			Тяжелый остаток	0,37	5880
			ЦВСГ	22,57	357360
			Потери	0,52	8225
Всего	100	1591680	Всего	100	1591680

Выход дизельной фракции, которая является целевым продуктом процесса, составляет 62 %, а ее качество соответствует нормам Евро-4. Сероводородная фракция направляется на получение серы по методу Клауса. Фракция нафты направляется на установку каталитического риформинга для получения качественного базового бензина.

## ПОДБОР РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНО-СЕРНОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМ ВОДОПОДГОТОВКИ

*Сысоев В.С., Ютик А.С., Кузнецова А.А., Герасимова Е.С.  
УрФУ*

В современном строительстве не все традиционные материалы и технологии обеспечивают долговечность конструкций, эксплуатирующихся в современной среде, отличающейся большой агрессивностью. В связи с этим возникает проблема разработки новых и совершенствования существующих материалов и технологий с учетом современных требований и новых задач, стоящих перед строительной отраслью. Один из таких перспективных материалов – серобетон.

Главным отличием технологии производства серобетонных смесей является её приготовление при температуре 140±5 °С. Тепловлажностная обработка (ТВО) цементных бетонов производится при 90 °С. Как видно, температуры для обоих видов бетона различны. По этой причине цементно-серный мелкозерни-